第 37 卷第 4 期 生 态 学 报 Vol.37,No.4
2017 年 2 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Feb.,2017

DOI: 10.5846/stxb201605090894
赵小娜,秦浩,张峰.山西文峪河上中游森林群落多样性.生态学报,2017,37(4):1093-1102.
Zhao X N, Qin H, Zhang F. Diversity of forest communities in the upstream and middle reaches of the Wenyu River watershed, Shanxi. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1093-1102.

山西文峪河上中游森林群落多样性

赵小娜[1],秦 浩[1],张 峰[1,2,*]
1 山西大学黄土高原研究所,太原 030006
2 山西大学生命科学学院,太原 030006

摘要:基于山西文峪河上中游森林群落的野外调查数据,选取植物生活型、生活史、固氮类型、传粉途径、种子传播途径等 14 个植物功能性状,计算丰富度指数(R)、多样性指数(H')、均匀度指数(E)等物种多样性指数和功能丰富度指数(*FRic*)、功能均匀度指数(*FEve*)、功能分歧度指数(*FDiv*)等功能多样性指数,并用 TWINSPAN 对森林群落进行分类,Spearman 秩相关分析多样性指数间及其与环境因子间的相关性,对山西文峪河上中游森林群落多样性进行研究。结果表明:青杆林种数最多($R=27$),辽东栎油松林和油松林种数最少($R=16$);白桦林的 H' 和 E 最大,油松林的 H' 和 E 最小。山杨白桦林的 *FRic* 值最大,白杄林的 *FRic* 值最小;青杄林的 *FEve* 值最大,山杨白桦林的 *FEve* 值最小;山杨林的 *FDiv* 值最大,白桦林的 *FDiv* 值最小。文峪河上中游森林群落物种多样性指数与功能多样性指数间相关性不显著($P>0.05$),仅 *FDiv* 与 H' 呈显著负相关关系($P<0.05$);物种多样性指数间呈极显著相关关系($P<0.01$),功能多样性指数间相关性不显著($P>0.05$),仅 *FRic* 与 *FEve* 呈显著负相关关系($P<0.05$);随着海拔增加,物种多样性指数增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$),但功能多样性指数减小($P<0.01$ 或 $P>0.05$)。

关键词:文峪河上中游;森林群落;物种多样性;功能多样性;海拔

Diversity of forest communities in the upstream and middle reaches of the Wenyu River watershed, Shanxi

ZHAO Xiaona[1], QIN Hao[1], ZHANG Feng[1,2,*]
1 *Institute of the Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*
2 *Shool of Life Science, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*

Abstract: Over the past 10 years, ecosystem functional diversity has played an important role in ecological research. Many studies have revealed that biodiversity has a substantial impact on ecosystem function through functional diversity, i.e., functional diversity is the factor closely related to the ecological process of biological diversity. The diversity of forest communities in the upstream and middle reach of the Wenyu River watershed, Shanxi was studied based on the field survey data. In the forest communities, we determined the growth form, life history, types of nitrogen fixation, C3/C4 type, light tolerance, leaf type, flower type, pollination mode, fruit type, seed propagation, flowering time, flowering phase, fruitage time and fruit season. These variables were used as plant functional traits to calculate species diversity indices, including richness index (R), species diversity index (H'), and evenness index (E), as well as functional diversity indices including the functional richness index (*FRic*), functional evenness index (*FEve*), and functional divergence degree index (*FDiv*). Classification of forest communities was analyzed using TWINSPAN and the correlation among diversity indices and between diversity indices and environmental factors were determined using Spearman's rank correlation analysis. The results

基金项目:科技部科技基础性工作专项资助项目(2011FY110300,2015FY110300);山西省自然科学基金资助项目(20130110371);我国主要灌丛植物群落调查资助项目(2015FF110300);2016 年山西省研究生教育创新项目(2016BY015)

收稿日期:2016-05-09; **修订日期**:2016-08-05

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: fzhang@sxu.edu.cn

indicated that: 1) Based on the TWINSPAN classification results and in accordance with the principle and method of classification of vegetation, 52 forest quadrats in the upstream and middle reach of the Wenyu watershed were classified into nine formations, including Form. *Betula platyphylla*, Form. *Picea meyeri*, Form. *Larix principis-ruprechtii*, Form. *Quercus wutaishanica*, Form. *Quercus wutaishanica* + *Pinus tabuliformis*, Form. *Picea wilsonii*, Form. *Populus davidiana* + *Betula platyphylla*, Form. *Populus davidiana* and Form. *Pinus tabuliformis*. 2) The number of species was greatest in Form. *Picea wilsonii* ($R = 27$) and Form. *Quercus wutaishanica* + *Pinus tabuliformis*, whereas Form. *Pinus tabuliformis* had the least ($R = 16$); the H' and E of Form. *Betula platyphylla* were the largest, and they were smallest for Form. *Pinus tabuliformis*. 3) The *FRic* of Form. *Populus davidiana* + *Betula platyphylla* was largest, and it was smallest for Form. *Picea meyeri*; the *FEve* of Form. *Picea wilsonii* was the largest, and it was smallest for Form. *Populus davidiana*+ *Betula platyphylla*; the *FDiv* of Form. *Populus davidiana* was largest, and it was smallest for Form. *Betula platyphylla*. 4) There was no correlation between the forest community species diversity index and functional diversity index ($P > 0.05$), with only *FDiv* and H' being significantly negatively correlated ($P<0.05$). 5) The correlation between the species diversity indices was highly significant ($P<0.01$), the correlation between the functional diversity indices was not significant ($P > 0.05$), and *FRic* and *FEve* were significantly negatively correlated ($P<0.05$). 6) The R value and altitude were highly significantly positively correlated ($P<0.01$), the H' value and altitude were significantly positively correlated ($P<0.05$), the H' the E values were significantly negatively correlated ($P < 0.05$), the *FDiv* value and latitude were highly significantly negatively correlated ($P<0.01$), the *FDiv* value and altitude were highly significantly negatively correlated ($P<0.01$). 7) As altitude increased, the species diversity index increased, and the linear relationship between the R and E values changed with altitude and was significant ($P < 0.05$); the linear relationship between the H' value and altitude was highly significant ($P<0.01$), but as the functional diversity index decreased, the linear relationship between the *FRic* and *FEve* values changed with altitude was not significant ($P > 0.05$); the linear relationship between the *FDiv* value and altitude was highly significant ($P < 0.01$).

Key Words: upstream and middle reaches of the Wenyu River watershed; forest community; species diversity; functional diversity; altitude

生物多样性的测度常用物种多样性来表征[1],但不同种在形态、生理、生态等方面都具有较大差异,单纯的物种多样性测度已经难以反映生物多样性在生态系统中的重要功能[2]。生物多样性不仅可用物种多样性来表达,而且可用种间功能特征的差异性来表达[3]。植物功能性状反映了植物对变化的生物和物理环境的适应性及在不同功能之间的权衡[4],主要包括植物的生活型、生活史、固氮类型、叶形、花型、传粉途径、种子传播途径、花期、果期等。

功能多样性由功能多样性指数来表示,直接反映了植物的性状,可以更准确的描述生物多样性。近些年对于功能多样性的研究报道较多,如么旭阳等研究了长白山阔叶红松林的 4 种主要植物群落,对植物的功能性状进行了分析,说明群落间功能多样性指数的差异是由植物本身的遗传特性与环境因素影响[5]。薛倩妮等研究了山西五鹿山森林群落的木本植物的功能多样性,得出物种差异是引起功能多样性差异的主要因素的结论[6]。徐远杰等分析了伊犁河两岸科古琴山南坡(河谷北坡)和乌孙山北坡(河谷南坡)环境因子与物种多样性指数间的关系,表明在以海拔为主的多种环境因子综合作用下造成了山地物种多样性的垂直分布格局[7]。但对于山西省文峪河流域的植被功能多样性的研究尚未见报道,为此本文对于文峪河上中游的森林群落进行调查,分析物种多样性指数和功能多样性指数,研究功能多样性指数间的差异以及物种多样性指数与功能多样性指数间的联系,为文峪河流域森林资源的保护和管理提供科学依据。

1 研究地概况

文峪河为汾河的一级支流,源头位于山西庞泉沟国家级自然保护区核心区的庞泉沟尽头。文峪河上中游

行政区划属于山西省交城县[8-9]。地理位置:111°26′22.38″—111°48′31.86″E,37°37′16.73″—37°53′02.25″N。气候属于受季风影响和控制的暖温带大陆性山地气候,年平均温度为 4.2℃,年平均降水量为 822.6 mm[10];年平均蒸发量为 1100—1500 mm,年平均相对湿度为 70.9%,年平均无霜期为 100—130 d[11]。

该区域植被资源丰富,主要森林群落有青杆(*Picea wilsonii*)林、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林、白杆(*Picea meyeri*)林、油松(*Pinus tabuliformis*)林等[10,12],灌丛植被主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)灌丛、三裂绣线菊 (*Spiraea trilobata*)灌丛、黄刺玫(*Rosa xanthina*)灌丛等[8],草本植物群落主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)草丛、披针薹草(*Carex lanceolata*)草丛、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)草丛等[11,13]。

2　研究方法

2.1　野外调查

在文峪河上中游交城县双家寨、西葫芦、云顶山、孝文山、庞泉沟等地以典型取样的方法选取了 52 块森林样地,样地分布如图 1。群落类型包括华北落叶松林、青杆林、白杆林、白桦林、山杨(*Populus davidiana*)林、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)林、油松林等;海拔 1409 —2588 m。每个样方面积 30 m×20 m,记录群落总盖度、乔木层盖度、每种乔木的高度、胸径、冠幅等;在样方对角线上选取 2 个 10 m×10 m 的小样方,记录灌木层盖度、每种灌木高度、基径、株数、盖度等;选取 6 个 1 m×1 m 的小样方,记录草本层盖度、高度等。同时记录每个样方的环境因子,包括经纬度、海拔、坡度、坡向、受干扰程度等[14]。

确定每种植物的功能性状,包括生长型、生活史、固氮类型、C3/C4 型、光耐受性、叶形、花型、传粉方式、果实类型、种子传播方式、开花时间、花期、结果时间、果期等 14 个性状。

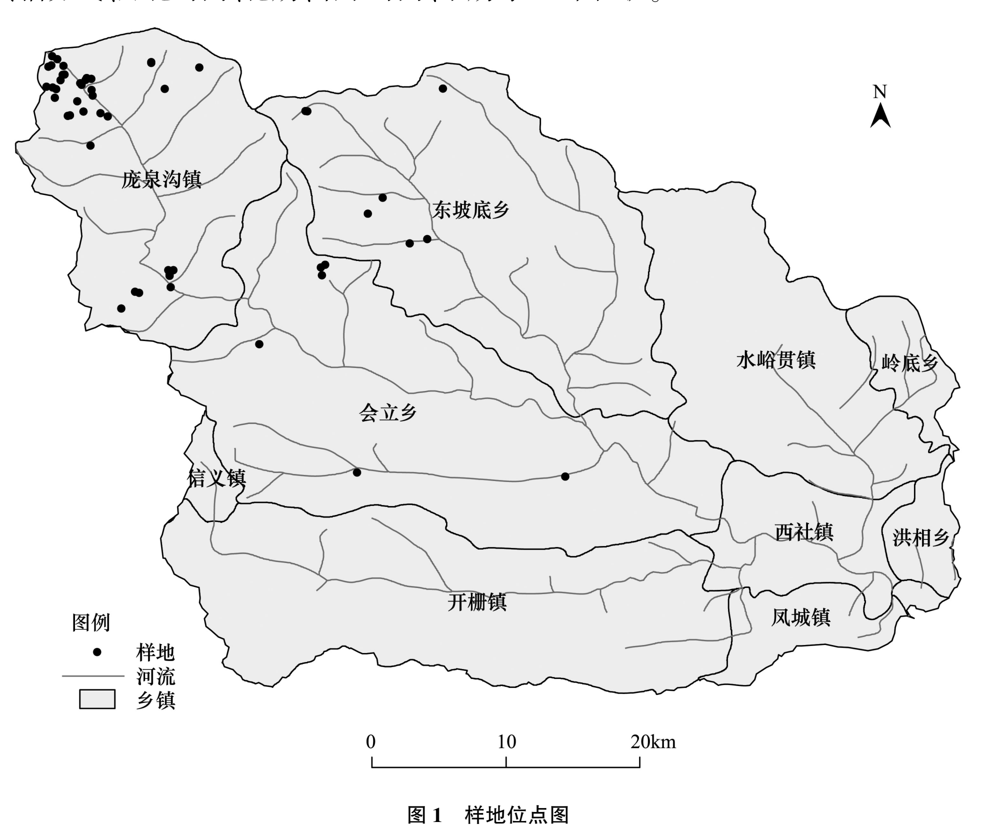


图 1　样地位点图

Fig.1　Sketch map of the stands distribution

2.2　数据处理

2.2.1　重要值计算

计算每个样方中每个种的重要值,公式如下[15]:

$$IV_{乔} = (相对盖度+相对高度+相对胸径)/3 \quad (1)$$

$$IV_{灌} = (相对盖度+相对高度)/2 \quad (2)$$

$$IV_{草} = (相对盖度+相对高度)/2 \quad (3)$$

2.2.2 物种多样性指数

利用重要值计算物种多样性指数 R、H'、E,公式如下[16]:

丰富度指数 $$R = S \quad (4)$$

Shannon-Wiener 指数 $$H' = -\sum_{i=1}^{S} \frac{N_i}{N}\ln(\frac{N_i}{N}) \quad (5)$$

均匀度指数 $$E = H'/\ln S \quad (6)$$

式中,S 为样方中的物种数,N_i为第 i 个物种的重要值,N 为样方中的所有物种重要值之和。

2.2.3 功能多样性指数

功能丰富度指数 FRic 为物种在群落内的功能空间大小[17],既与物种功能生态位大小有关,又与功能特征值范围有关。FRic 值越大,则物种的潜在有效资源被利用的越充分,生产力越高[18]。计算公式如下:

$$\text{FRic} = \text{SFic}/Rc \quad (7)$$

式中,FRic 为群落 i 中特征 c 的功能丰富度;SFic 为群落内物种所占据的生态位;Rc 为绝对特征值范围。

功能均匀度指数 FEve 为群系内物种功能特征在生态空间分布的均匀度[19],体现了群系内物种全方位利用有效资源的效率[20]。FEve 值越大,则群系内物种对于有效资源的全方位利用率越高。计算公式如下:

$$\text{FEve} = \sum_{i=1}^{S} \min(P_i, \frac{1}{S}) \quad (8)$$

式中,P_i 为种 i 的相对特征值,S 为种数。

功能分歧度指数 FDiv 描述群系中物种特征值的异质性[21]。FDiv 值越大,则群系中物种间生态位的重叠越低,竞争越弱[20],计算公式如下:

$$\text{FDiv} = \frac{2}{\pi}\text{arcatn}[5 \times \sum_{i=1}^{N}[(\ln C_i - \overline{\ln x})^2 \times A_i]] \quad (9)$$

式中,C_i 为第 i 项功能特征值;A_i 为第 i 项功能特征的相对丰富度,$\overline{\ln x}$为物种特征值自然对数的加权平均(即以种的多度为权重),N 为群落的种数。

2.3 统计分析

用 TWINSPAN 对森林群落进行分类。采用单因素方差方法分析群系间多样性指数的差异。运用 Spearman 秩相关分析多样性指数间及其与环境因子间的相关性。

3 研究结果

3.1 群系的物种多样性指数和功能多样性指数

根据文峪河上中游森林植被 TWINSPAN 分类结果(图 2),按照《中国植被》关于植被分类的原则和方法,将 52 个森林样方分为 9 个群系:群系 1 为白桦林(包括样方 3、10、39、42、43、44 和 46);群系 2 为白杄林(包括样方 29、30 和 32);群系 3 为华北落叶松林(包括样方 12、23—28 和 34);群系 4 为辽东栎林(包括样方 4、13、14、22、36、37、40、47 和 48);群系 5 为辽东栎油松林(包括样方 20、21 和 35);群系 6 为青杄林(包括样方 11、31 和 33);群系 7 为山杨白桦林(包括样方 41、45 和 49);群系 8 为山杨林(包括样方 50、51、52);群系 9 为油松林(包括样方 1、2、5—9、15—19 和 38)。

9 个群系的物种多样性、功能多样性指数见图 3。由图 3 可知,群系 6 的 R 值最大(R=27),即青杄林的种数最多;群系 1、群系 3 和群系 7 的种数相同(R=25);之后是群系 8(R=23);种数最少的是群系 5 和群系 9(R=16)。

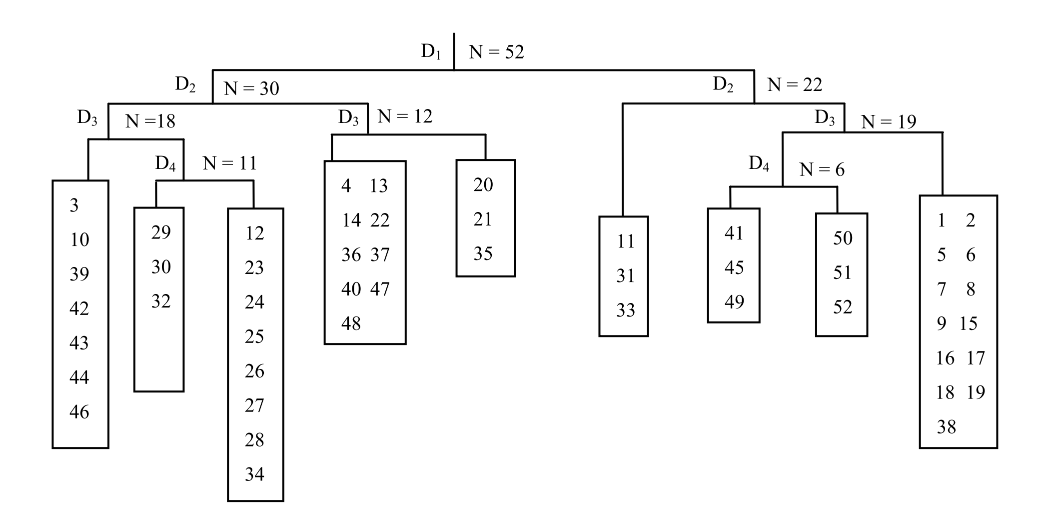


图 2　TWINSPAN 分类结果图

Fig.2　Result of TWINSPAN for the forest communities

由图 3 可以看出,每个群系的均匀程度不完全相同,但差异较小,其中群系 1 的 H'最大(H'=4.673),群系 9 的 H'最小(H'=3.026)。

图 3 可以看出,所有群系间的 E 值相似性较大,即差异不显著(P>0.05)。群系的物种多样性是由丰富度和均匀度二者共同决定的,例如群系 6 的 R 值大于群系 7 的 R 值,但是 E 值为群系 7 大于群系 6,所以 H'值群系 6 和群系 7 较为接近。

从图 3 可看出群系 7 的 FRic 值最大(FRic = 14.602),其次是群系 9、群系 1,群系 2 的值最小(FRic = 5.976)。

从图 3 可以看出,所有群系间的 FEve 值相似性较大(P>0.05)。群系 6 的 FEve 值最大(FEve = 0.701),群系 7 值最小(FEve = 0.58),但差异较小,仅有 0.121。

由图 3 可以看出,各群系的差异显著(P<0.05)。群系 8 的 FDiv 值最大(FDiv = 0.898),说明群系 8 中物种的生态位重叠最小,对功能多样性的增加最大;相反群系 1 的 FDiv 值最小(FDiv = 0.556),则物种的生态位重叠最大,对功能多样性的增加最小。

3.2　多样性指数间的相关分析

52 个样方物种多样性指数与功能多样性指数间的相关分析结果见表 1。从表 1 可以看出,R 与 H'呈极显著正相关关系(P<0.01),R 与 E 呈极显著正相关关系(P<0.01);H'与 E 呈极显著正相关关系(P<0.01)。FRic 与 FEve 呈显著负相关关系(P<0.05),FDiv 与 H'呈显著负相关关系(P<0.05)。

表 1　物种多样性指数与功能多样性指数的相关分析结果

Table 1　Results of correlation analysis between species diversity indices and functional diversity indices

指数 Index	丰富度 R	物种多样性 H'	均匀度 E	功能丰富度 Fric	功能均匀度 Feve	功能分歧 Fdiv
丰富度 R	1	0.857 **	0.595 **	−0.003	−0.041	−0.232
物种多样性 H'	0.857 **	1	0.921 **	0.006	0.146	−0.283 *
均匀度 E	0.595 **	0.921 **	1	−0.015	0.272	−0.261
功能丰富度 Fric	−0.003	0.006	−0.015	1	−0.306 *	−0.144
功能均匀度 Feve	−0.041	0.146	0.272	−0.306 *	1	0.098
功能分歧 Fdiv	−0.232	−0.283 *	−0.261	−0.144	0.098	1

* P<0.05; ** P<0.01; R: Richness index; H': Species diversity index; E: Evenness index; Fric: Functional richness index; Feve: Functional evenness index; Fdiv: Functional divergence degree index

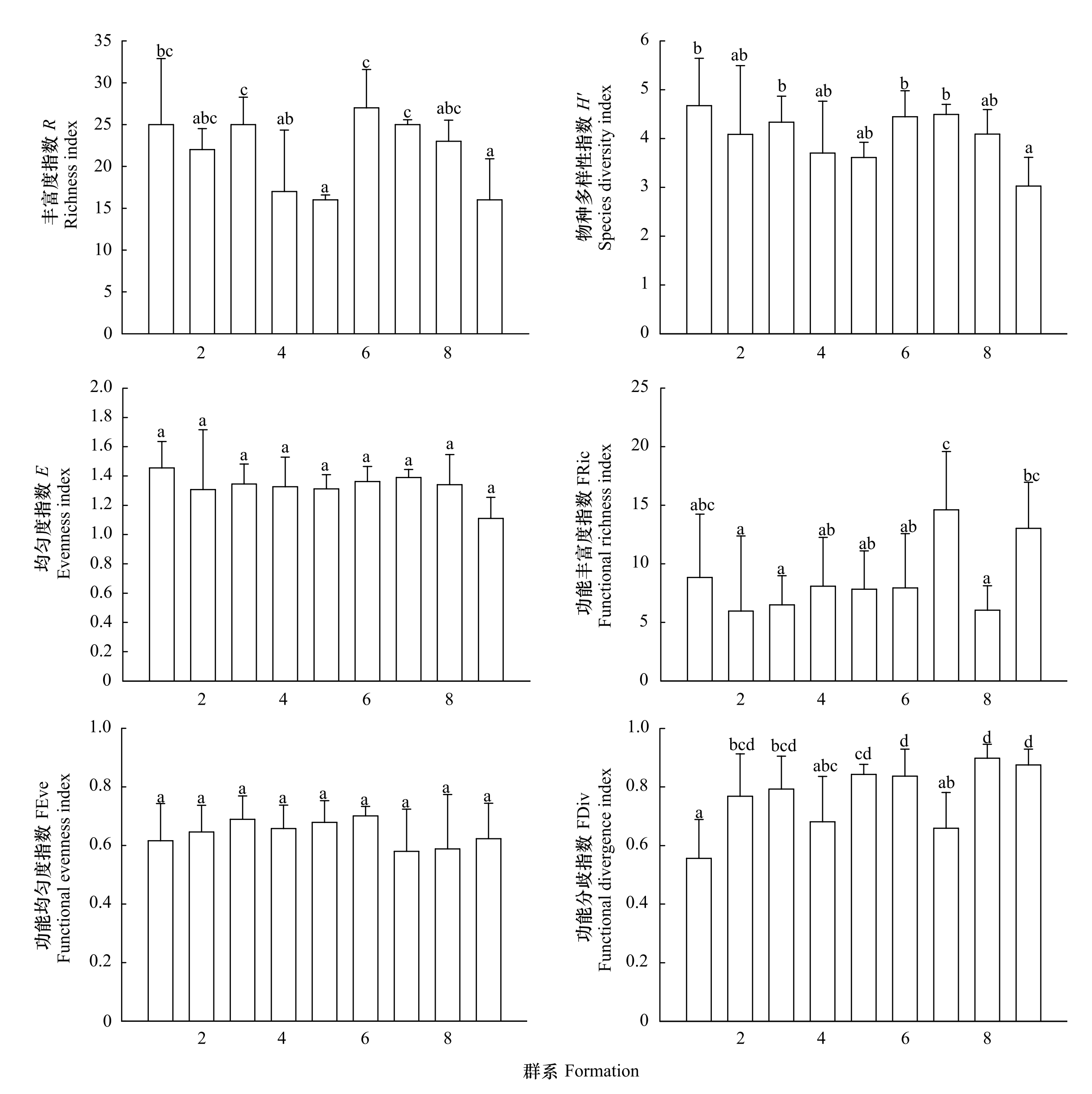


图 3 物种多样性、功能多样性指数

Fig.3 Species diversity and functional diversity indices

3.3 多样性指数与环境因子间的相关分析

52 个样方物种多样性指数、功能多样性指数与环境因子间的相关分析结果见表 2。

表 2 物种多样性指数、功能多样性指数与环境因子间相关分析结果

Table 2 Results of correlation analysis between species diversity indices, functional diversity indices and environmental factors

指数 Index	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect
丰富度 R	0.236	0.072	0.402 **	−0.206	0.137
物种多样 H'	0.256	−0.059	0.357 *	−0.316 *	0.065
均匀度 E	0.247	−0.163	0.272	−0.339 *	0.002
功能丰富度 Fric	−0.209	0.024	−0.261	−0.200	0.209
功能均匀度 Feve	−0.041	−0.186	−0.028	−0.001	−0.055
功能分歧 Fdiv	−0.415 **	0.110	−0.418 **	0.117	−0.270

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

由表 2 可以看出,*R* 与海拔呈极显著正相关关系($P<0.01$);*H′* 与海拔呈显著正相关关系($P<0.05$),与坡度呈显著负相关关系($P<0.05$);*E* 与坡度呈显著负相关关系($P<0.05$);*FDiv* 与纬度呈极显著负相关关系($P<0.01$),与海拔呈极显著负相关关系($P<0.01$)。

由于影响多样性指数的主要环境因素为海拔,通过海拔与多样性指数间的散点图(图 4)可以更清楚看出海拔对于多样性指数的影响。

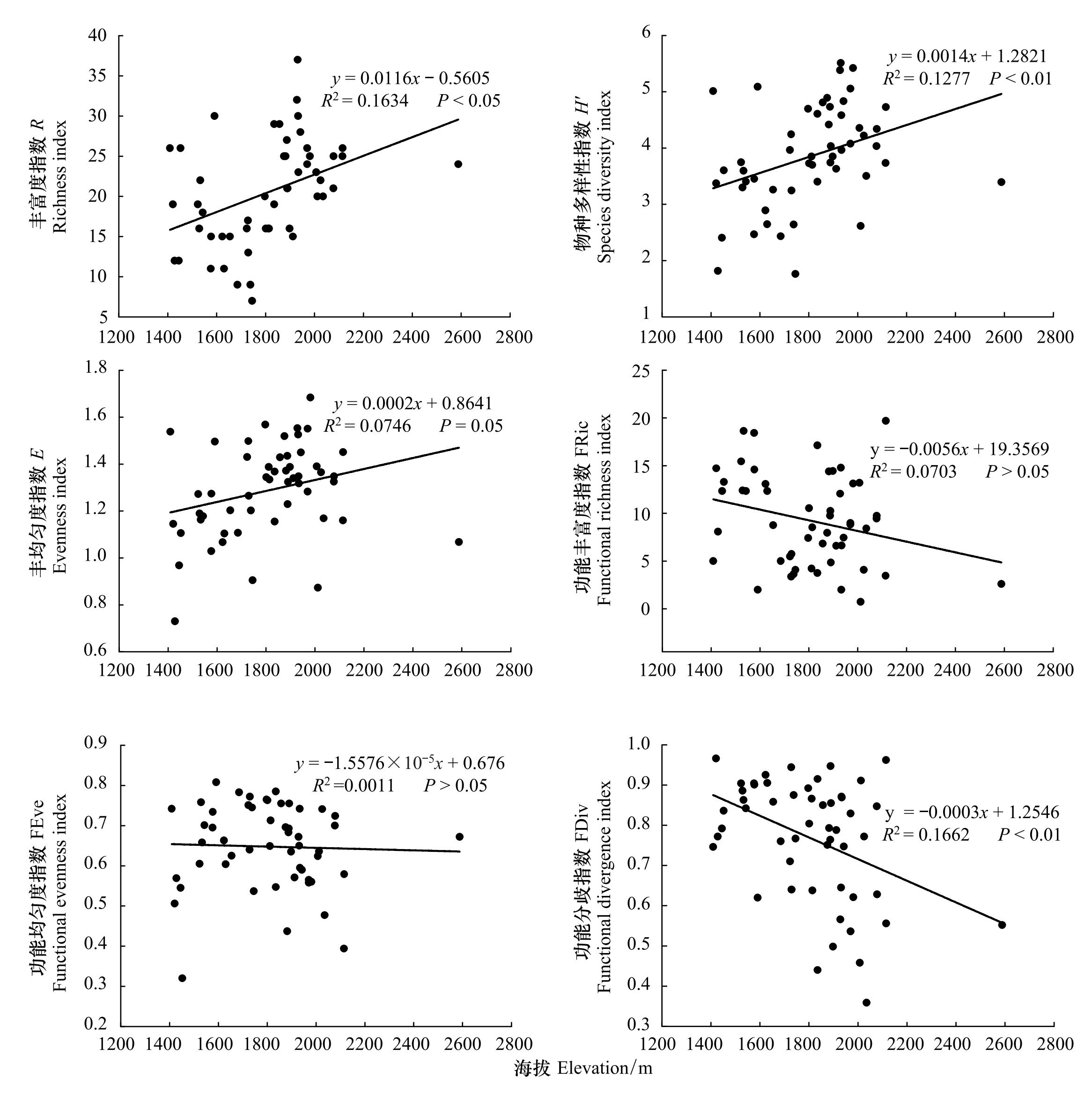


图 4　多样性指数与海拔的关系

Fig.4　Relationship between diversity index and altitude

从图 4 可以看出,*R* 值随海拔变化的线性关系显著($P<0.05$),且随海拔增加而增加;*H′* 值随海拔变化的线性关系极显著($P<0.01$),且随海拔增加而增加;*E* 值随海拔变化的线性关系显著($P<0.05$),且随海拔增加而增加;FRic 值、FEve 值随海拔变化的线性关系不显著($P>0.05$);FDiv 值随海拔变化的线性关系极显著($P<0.01$),但随海拔增加而降低(图 4)。

4　讨论

4.1　森林群落多样性分析

范玮熠[22]等对于陕西子午岭森林群落物种多样性研究表明,物种多样性指数总体上呈现出人工林最小,

天然混交林最大,天然纯林居中。本文关于文峪河上中游流域的森林群落多样性研究结果与范玮熠等的研究结果相近。

图 3*R* 是丰富度指数(即种数)。群系 6 的 *R* 值最大,为青杆林,虽然只包含 3 个样方,但样方海拔较高(1850—2000 m),位于山地的中上部甚至是山顶,水分条件及光照条件都较好,并且人为干扰很小,适宜植物生长。青杆生长于土壤湿润、深厚并且排水良好的地区,生境也适于大部分植物生长[23],所以青杆林物种数最多。群系 5 和群系 9 的 *R* 值最小,群系 5 是辽东栎油松林,群系 9 是油松林;虽然油松林包含的样方数最多,但多分布于较低海拔(1400—1650 m,仅有 1 个样方分布于海拔 1738 m)的阳坡、半阳坡,水分条件较差,加之距居民点较近,人类活动干扰较大,并且本区域的油松林多为人工林,林下灌木层和草本层发育较差,所以 *R* 值较低。*H'* 为物种多样性指数,反映了群落中物种组成的均匀程度,即所有的物种多度一样的时候,*H'* 最大[24];*E* 为均匀度指数,是指群落中物种的分布情况,分布越不均匀则 *E* 值越小[25];*H'*、*E* 与 *R* 呈极显著正相关关系($P<0.01$)(表 1),所以 *H'*、*E* 变化原因与 *R* 类似。

群系 8 是山杨林,群系 7 是山杨白桦林,群系 1 是白桦林,从图 3 可看出 FRic 值的关系为:群系 7>群系 1>群系 8。群系 7 乔木层物种较多,与单优势种的森林群落相比,对资源的利用更充分,物种数更多,功能丰富度指数就较高。白桦林海拔 1409—2035 m,海拔分布幅度较大,适宜于各类物种生长,所以功能丰富度指数也较高。山杨林海拔 1797—2114 m,海拔较高且幅度相对较小,热量条件较差,适宜耐寒植物生长,因此,功能丰富度指数较低。由于文峪河上中游地区环境良好、人为干扰相对较小,适宜于植物发育和生长,因此图 3 的 FEve 指数间差异不显著($P>0.05$),即各物种对于资源的利用情况相似。虽然山杨林(群系 8)生境对灌木层和草本层物种生长有较大的限制,但由于它们多为不同属、不同科的物种,彼此间亲缘关系较远,因此 FDiv 值最大,而群系 1 中物种亲缘关系较近(图 3(F))。

从表 1 可以看出,在文峪河上中游地区森林群落的物种多样性指数与功能多样性指数的相关性不显著($P>0.05$),只有 FDiv 与 *H'* 呈显著负相关关系($P<0.05$)。这说明功能多样性变化与物种变化的相关性不显著,是因为由于环境的原因,物种即使增加,也多为亲缘关系较近的种,对功能多样性影响不显著。所以物种多样性指数与功能多样性指数间相关性不显著。

4.2 群落多样性与环境因素的关系分析

刘建泉[26]对于大东河林区青海云杉林研究表明:影响物种多样性的因素按重要程度排序为坡向>苔藓盖度>土壤容重>土壤孔隙度>群落类型>郁闭度。高俊峰[27]等对北京灵山地区植物研究发现,海拔梯度对于物种多样性影响最大,其次是影响有机质、pH 值、水分等因子。陈廷贵[28]等对山西关帝山神尾沟植物群落研究发现,阳坡物种多样性大于阴坡;乔灌木层物种多样性随海拔升高而下降。本文对文峪河上中游流域的森林群落多样性与环境因素的相关分析表明,与前述研究结果有一定差异,在影响物种多样性的环境因素中海拔是影响多样性变化的主导因子,其次是坡度;这可能与研究区域海拔梯度变化较为明显,进而导致热量条件随之发生改变,最终导致群落类型垂直分布分化明显所致,如从海拔 1409—2588 m 相继出现落叶阔叶林带-温性针叶林带-寒温性针叶林带。

从图 4 可看出,多样性指数与海拔间关系显著($P<0.05$ 或 $P<0.01$),说明海拔对于森林群落的区系组成、结构和多样性影响极为重要[29]。从表 2 可看出,海拔是所有环境因子间与多样性指数关系最密切的。物种多样性指数与海拔呈正相关关系 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$)(图 4);而功能多样性指数 FDiv 与海拔呈极显著负相关关系($P<0.01$)(图 4)。这是因为在文峪河上中游地区,随着海拔的增加,居民点密度会越来越小,人口数量越来越小,人为干扰活动会越来越少,降水增加温度降低,适宜于耐寒植物的生长,如照山白(*Rhododendron micranthum*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、凹舌兰(*Coeloglossum viride*)、升麻(*Cimicifuga foetida*)、黄精(*Polygonatum sibiricum*)、沙参(*Adenophora stricta*)、活血丹(*Glechoma longituba*)、细叶鸢尾(*Iris tenuifolia*)等,物种数会逐渐增加,随之 *H'* 值、*E* 值也会增加(图 3)。虽然种数逐渐增加,但增加的种多数为同科同属植物,因此物种功能形态异质性较少,功能多样性指数逐渐下降。这与张金屯等关于北京百花山植被功能多样性随

海拔上升到一定程度后下降[30]的结论不同,这是由于北京为平原地区,海拔较低,百花山的海拔跨度(750—2043 m)相对较大,随海拔增加,降水增加温度下降,达到一定海拔时温度下降比降水增加对于植被生长影响大,植物中耐寒种占优势,因此功能多样性下降。

坡度与 H'、E 呈显著负相关关系($P<0.05$)(图 4),即坡度越大物种多样性指数越小。因为坡度越大,涵养水分和养分的能力可能就越小[31],中生植物种数可能就会相应减少,耐干旱贫瘠的植物类群更具优势,物种多样性和均匀度减小。

影响多样性变化的环境因素众多,如土壤 pH、土壤有机质和全氮含量[32]、人为干扰[33]等有待于以后进一步探索。

5　结论

文峪河上中游森林群落的物种多样性指数与功能多样性指数相关性不显著;物种多样性指数间呈极显著相关关系,功能多样性指数间相关性不显著。海拔是影响森林群落物种多样性和功能多样性的主导环境因素。

参考文献(References):

[1] 罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 邓婵娟, 吴金水, 胡荣桂. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响. 生态学报, 2009, 29(2): 740-748.

[2] Hooper D U, Vitousek P M. Effects of plant composition and diversity on nutrient cycling. Ecological Monographs, 1998, 68(1): 121-149.

[3] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: back to basics and looking forward. Ecology Letters, 2006, 9(6): 741-758.

[4] Díaz S, Cabido M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. Trends in Ecology & Evolution, 2001, 16(11): 646-655.

[5] 么旭阳, 胡耀升, 刘艳红. 长白山阔叶红松林不同群落类型的植物功能性状与功能多样性. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 77-84.

[6] 薛倩妮, 闫明, 毕润成. 山西五鹿山森林群落木本植物功能多样性. 生态学报, 2015, 35(21): 7023-7032.

[7] 徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 付爱红, 马晓东, 桂东伟, 陈亚鹏. 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1142-1154.

[8] 李素新, 张芸香, 郭晋平. 文峪河上游河岸林与相邻高地林土壤属性比较分析. 山西林业科技, 2012, 41(2): 5-9.

[9] 郭跃东, 孙悦燕, 郭晋平. 文峪河中游主要森林类型水文效应比较研究. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 340-345.

[10] 高润梅, 郭晋平, 郭跃东, 张东旭. 文峪河上游河岸林的群落结构与多样性特征. 林业科学研究, 2011, 24(1): 74-81.

[11] 张芸香, 张晋明, 郭晋平. 文峪河上游河岸林凋落物及其分解过程研究. 林业科学研究, 2011, 24(5): 634-640.

[12] 张东旭, 郭晋平, 郭跃东. 文峪河上游河岸带及其毗邻高地植物群落优势种密度结构的研究. 林业资源管理, 2011, (5): 47-52.

[13] 李世广, 张峰. 山西庞泉沟国家级自然保护区生物多样性与保护管理. 北京: 中国林业出版社, 2014.

[14] 赵小娜, 秦晓娟, 董刚, 张峰. 庞泉沟自然保护区植物群落分类学多样性. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3437-3442.

[15] 李旭华, 邓永利, 张峰, 董刚, 李世广. 山西庞泉沟自然保护区森林群落物种多样性. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1667-1673.

[16] 陈姣. 生态恢复工程对历山舜王坪亚高山草甸植被的影响研究[D]. 太原: 山西大学, 2012.

[17] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, Wilson J B. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. Oikos, 2005, 111(1): 112-118.

[18] Petchey O L. Integrating methods that investigate how complementarity influences ecosystem functioning. Oikos, 2003, 101(22): 323-330.

[19] Mouillot D, Mason W H N, Dumay O, Wilson J B. Functional regularity: a neglected aspect of functional diversity. Oecologia, 2005, 142(3): 353-359.

[20] 张金屯, 范丽宏. 物种功能多样性及其研究方法. 山地学报, 2011, 29(5): 513-519.

[21] Wacker L, Baudois O, Eichenberger-Glinz S, Schmid B. Diversity effects in early- and mid-successional species pools along a nitrogen gradient. Ecology, 2009, 90(3): 637-648.

[22] 范玮熠, 王孝安, 郭华, 王世雄, 段仁燕. 陕西子午岭森林群落的物种多样性研究. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 59-65.

[23] 陈思, 董永恒, 高智辉, 潘世成, 李智军, 樊金拴. 甘肃兴隆山保护区青杆群落结构分析. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 39-45.

[24] 马克平. 生物群落多样性的测度方法：I α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 1994, 2(3)：162-168.
[25] 李旭华. 晋南地区植被与环境关系分析[D]. 太原：山西大学, 2014.
[26] 刘建泉. 影响东大河林区青海云杉林物种多样性的因素. 草业科学, 2015, 32(1)：28-35.
[27] 高俊峰, 马克明, 祁建, 冯云, 冯宗炜. 北京东灵山地区农耕干扰和环境梯度对植物多样性的影响. 西北植物学报, 2008, 28(12)：2506-2513.
[28] 陈廷贵, 张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究：I. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 应用与环境生物学报, 2000, 6(5)：406-411.
[29] Xu Y, Zhang J T. Quantitative analysis of endangered *Acanthopanax senticosus* communities in Dongling Mountain of Beijing. Frontiers of Biology in China, 2008, 3(4)：507-511.
[30] Zhang J T, Li M, Nie E B. Pattern of functional diversity along an altitudinal gradient in the Baihua Mountain Reserve of Beijing, China. Brazilian Journal of Botany, 2014, 37(1)：37-45.
[31] 王恒松, 熊康宁, 张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究. 水土保持通报, 2015, 35(4)：1-7.
[32] 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 赵发珠, 韩新辉, 冯永忠, 杨改河, 任广鑫. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究. 草地学报, 2014, 22(2)：291-298.
[33] 毛志宏, 朱教君, 谭辉. 干扰对辽东山区次生林植物多样性的影响. 应用生态学报, 2006, 17(8)：1357-1364.